

## Підготовчі процеси збагачення

УДК 622.7

**Т.А. ОЛЕЙНИК**, д-р техн. наук,

**Л.В. СКЛЯР, Н.В. КУШНИРУК**, кандидаты техн. наук,

**М.О. ОЛЕЙНИК**

(Украина, Кривой Рог, Криворожский национальный университет)

### КИНЕТИКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОЛИМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Важным условием эффективного обогащения рудной массы является высокая степень раскрытия выделяемых из нее компонентов. Полнота раскрытия рудных минералов весьма важна для получения железорудного концентрата с минимальной массовой долей кремнезема. Наряду с высокой степенью раскрытия железосодержащих минералов необходимо и минимальное образование тонкодисперсных шламовых фракций руды, эффективность обогащения которых невысока и снижается по мере уменьшения их крупности. Кроме того, поверхность рудных зерен должна быть после операции рудоподготовки наиболее чистой, с отсутствием закрепления дисперсных частиц нерудных минералов.

*Анализ исследований и публикаций.* Основываясь на результатах ранее выполненных исследований физико-механических свойств минеральных разновидностей окисленных руд при их разрушении, посредством макро– и микродеформирования, наиболее конкурирующими вариантами операции интенсивной рудоподготовки окисленной железной руды являются измельчение в стержневых и шаровых мельницах [1].

*Постановка задачи.* В процессе рудоподготовки железорудного сырья рассматривались два основных этапа. Первый – разрушение кусков руды под действием внешней силы, прилагаемой к совокупности кусков исходного сырья. Второй – кинетика образования класса  $-0,074(0,044)$  мм при условии стержневого и шарового измельчений проб руды.

*Изложение материала и результаты.* На технологические исследования были представлены 200 рядовых проб 9 минералогических разновидностей гематитовых кварцитов двух месторождений Скелеватского и Валявкинского (табл. 1), которые в определенных соотношениях составляют генеральную пробу для технологических исследований по разработке технологии обогащения окисленных руд КГОКОРа (табл. 2).

## Підготовчі процеси збагачення

Таблиця 1

Компоновка рядовых проб гематитовых кварцитов Скелеватского и Валявкинского месторождений в объединенные пробы

Объединенные пробы		Месторождение	
индексы	названия	Скелеватское	Валявкинское
1	2	3	4
1	Кварциты мартит-железнослюдковые	Скл-9, Скл-14, Скл-39, Скл-74	Влк-213, Влк-214, Влк-228, Влк-235, Влк-239, Влк-258, Влк-267, Влк-288
2	Кварциты железослюдо-мартитовые	Скл-4, Скл-15, Скл-16, Скл-17, Скл-28, Скл-37, Скл-38, Скл-80, Скл-81, Скл-84, Скл-90, Скл-91, Скл-92, Скл-100	Влк-208, Влк-212, Влк-220, Влк-221, Влк-223, Влк-249, Влк-253, Влк-255, Влк-257, Влк-272, Влк-295, Влк-296
3	Кварциты железослюдо-мартитовые маршалитизированные	Скл-5, Скл-6, Скл-12, Скл-20, Скл-21, Скл-30, Скл-45, Скл-46, Скл-56, Скл-76, Скл-77, Скл-78, Скл-89, Скл-93	Влк-206, Влк-215, Влк-216, Влк-245, Влк-250, Влк-259, Влк-265, Влк-280, Влк-281
4	Кварциты мартитовые	Скл-2, Скл-7, Скл-11, Скл-13, Скл-23, Скл-58, Скл-59, Скл-65, Скл-70, Скл-71, Скл-72, Скл-79, Скл-83, Скл-97	Влк-238, Влк-244, Влк-252, Влк-254, Влк-256, Влк-282, Влк-284, Влк-289
5	Кварциты мартитовые маршалитизированные	Скл-27, Скл-31, Скл-57, Скл-60, Скл-64, Скл-68, Скл-82, Скл-85, Скл-86, Скл-88, Скл-94	Влк-201, Влк-202, Влк-203, Влк-204, Влк-205, Влк-217, Влк-219, Влк-227, Влк-229, Влк-243, Влк-246, Влк-266, Влк-268, Влк-271, Влк-277, Влк-300
6	Кварциты мартитовые гетитизированные	Скл-18, Скл-19, Скл-24, Скл-25, Скл-26, Скл-29, Скл-40, Скл-42, Скл-43, Скл-44, Скл-47, Скл-48, Скл-49, Скл-50, Скл-53, Скл-54, Скл-55, Скл-62, Скл-63, Скл-87, Скл-95, Скл-98	Влк-207, Влк-209, Влк-225, Влк-230, Влк-233, Влк-247, Влк-248, Влк-261, Влк-262, Влк-274, Влк-275, Влк-285, Влк-291, Влк-298
7	Кварциты дисперсногематит-мартитовые	Скл-8, Скл-34, Скл-35, Скл-36, Скл-41, Скл-51, Скл-52, Скл-99	Влк-224, Влк-234, Влк-237, Влк-240, Влк-242, Влк-251, Влк-269, Влк-286, Влк-294, Влк-297, Влк-299
8	Кварциты мартитовые магнетит-содержащие	Скл-1, Скл-32, Скл-33, Скл-61, Скл-66, Скл-67, Скл-69, Скл-73	Влк-210, Влк-211, Влк-218, Влк-226, Влк-231, Влк-236, Влк-273, Влк-276, Влк-278, Влк-283
9	Сланцы и безрудные кварциты	Скл-3, Скл-10, Скл-22, Скл-75, Скл-96	Влк-222, Влк-232, Влк-241, Влк-260, Влк-263, Влк-264, Влк-270, Влк-279, Влк-287, Влк-290, Влк-292, Влк-293

Содержания материала объединенных разновидностей гематитовых кварцитов  
Скелеватского и Валявкинского месторождений в составе генеральной пробы

Объединенные минеральные разновидности гематитовых кварцитов		Содержание в составе представительной (генеральной) технологической пробы, мас. %
индексы	названия	
1о	Кварциты мартит-железнослюдковые	2,18
2о	Кварциты железнослюдко-мартитовые	11,40
3о	Кварциты железнослюдко-мартитовые маршалитизированные	8,36
4о	Кварциты мартитовые	27,45
5о	Кварциты мартитовые маршалитизированные	24,60
6о	Кварциты мартитовые гетитизированные	10,31
7о	Кварциты дисперсногематит-мартитовые и мартит-дисперсногематитовые ("суриковые")	6,64
8о	Кварциты мартитовые магнетит-содержащие (слабо выветренные)	4,50
9о	Сланцы и безрудные кварциты	4,56

Согласно, результатам детальных геолого-минералогических исследований, проведенных в мае-июле 2013 года под руководством проф. В.Д. Евтехова, в составе каждой объединенной разновидности окисленных железистых кварцитов выделяется одна или две ведущие (по количественной представленности в составе залежей окисленных железистых кварцитов) укрупненные разновидности; другие, присоединенные к ней (к ним) на основании близости минералогических показателей, в количественном отношении значительно менее представительны, и в случае отличия по некоторым показателям от ведущих – существенного влияния на общие характеристики объединенных разновидностей не оказывают.

В связи с тем, что основными минералами окисленных железистых кварцитов Скелеватского и Валявкинского месторождений являются мартит, железная слюдка, гетит, кварц, были изучены их прочностные характеристики, которые приведены в табл. 3, 4, 5, 6, 7.

*Таблиця 3*

Прочностные характеристики минералов окисленных железных руд

Минеральная разновидность	Прочностные характеристики			
	модуль микроупругости, Е, $10^{10}$ Па	микро-твердость, Н, $10^9$ Па	коэффициент упругости, К, %	нагрузка разрушения, Р, Н* $10^3$
Мартит	10±0,6	7,1±0,5	42,1±0,4	0,21±0,02
Железная слюдка	9,5±0,6	6,9±0,4	41,2±0,4	0,20±0,02
Гетит	9,6±0,7	6,8±0,4	40,6±0,5	0,20±0,02
Кварц	8,6±0,6	20,1±2,5	69,2±1,1	0,4±0,02

Прочностные характеристики минеральных образцов  
окисленной железной руды при испытании на сдвиг

Минеральная разновидность	Прочностные свойства	
	напряжение разрушения, $\sigma \cdot 10^3$ Па	удельный расход энергии, $10^3$ Дж/м <sup>3</sup>
Мартит	63	44,2
Железная слюдка	32	34,1
Гетит	48	56,3
Кварц	77	60,6

Таблиця 5

Прочностные характеристики образцов минералов  
окисленной железной руды при разрушении на изгиб

Минеральная разновидность	Напряжение разрушения, $\sigma \cdot 10^{-3}$ Па	Модуль упругости, $E \cdot 10^{-3}$ Па	Удельный расход энергии, $10^{-5}$ Дж/м <sup>3</sup>
Мартит	41,6	9,4	1,7
Железная слюдка	24,4	5,2	1,4
Гетит	31,8	8,0	1,6
Кварц	54,9	16,0	2,5

Таблиця 6

Физико-механические свойства минеральные разновидности окисленных  
железистых кварцитов и разубоживающих пород

Физико-механические свойства	Содержание минералов, %/ минеральные разновидности окисленных железистых кварцитов (см. табл.2)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Плотность, т/м <sup>3</sup>	3,88	3,22	3,31	3,58	3,27	3,16	3,24	3,41	2,81
Дробимость. мдис/м <sup>3</sup>	85,8	94,4	73,9	100	84,65	65,4	56,4	104,4	52,4
Коэффициент крепости	10,2	11,9	9,8	11,0	10,6	10,9	6,3	14,3	8,2
Пористость	8,5	4,5	7,4	7,7	4,8	39,5	8,2	4,2	4,6

Следует обратить внимание, что для мартит-железнослюдковых кварцитов (разновидность 1) характерна относительно низкая пористость, кавернозность. высокая способность к раскалыванию по слоистости из-за большого количества параллельно-чешуйчатых агрегатов железной слюдки. Для кварцитов железнослюдко-мартитовых (объединенная минеральная разновидность 2) характерна также относительно низкая пористость, кавернозность. Для объединенной минеральной разновидности 3 и для объединенной минеральной разновидности 5 – характерна сыпучесть, наличие высыпок тонкозернистого материала из забоев карьера; а для объединенной минеральной разновидности 4 – относительно низкая пористость, кавернозность. Кварциты мартитовые гетитизированные (объединенная минеральная разновидность 6) отличаются высокой пористо-

стью, трещиноватостью, кавернозностью; относительно высокой прочностью гетитизированных мармитовых кварцитов в связи с заполнением гетитом пор и трещин. Для объединенной минеральной разновидности 7 характерно относительно низкая пористость, трещиноватость, кавернозность и относительно низкая прочность; а для объединенной минеральной разновидности 8 – низкая пористость, трещиноватость, кавернозность; повышенная прочность. Сланцы и безрудные кварциты характеризуются низкой пористостью, кавернозностью, трещиноватостью.

*Таблица 7*

Физические свойства руды (генеральной пробы)						
Крупность материала, мм	Исходная руда		Промпродукт СМС		Хвосты СМС	
	Насыпной вес, т/м <sup>3</sup>	Угол ест. откоса, град	Насыпной вес, т/м <sup>3</sup>	Угол ест. откоса, град	Насыпной вес, т/м <sup>3</sup>	Угол ест. откоса, град
70-0	1,99	33,7				
10-0	1,92	36,4	2,22	34,5	1,72	34,3
Плотность, т/м <sup>3</sup>	3,54		3,7		2,87	
Влажность	3,7		3,7			

Руда массой 1,8 кг (для мельницы 40-А-Мл) и 8 кг (для мельницы МСЦ-14) измельчалась в шаровой и стержневой мельницах в течение различного времени (3, 8, 12, 17, 22, 27, 32, 37 мин). По результатам ситовых анализов измельченных продуктов были построены характеристики крупности, на основании которых определялось время, необходимое для измельчения руды до определенной крупности (рис. 1-18). Для дальнейших исследований время измельчения составило 10 минут. Так как прирост класса минус 0,044 мм при измельчении в шаровых мельницах выше в среднем на 10-18%, при подготовке руды к исследованиям отдано предпочтение измельчению в стержневой мельнице. Ситовая характеристика генеральной пробы, измельченной до 0,5-0 мм (62,5% класса минус 0,07 мм) приведена в табл. 8

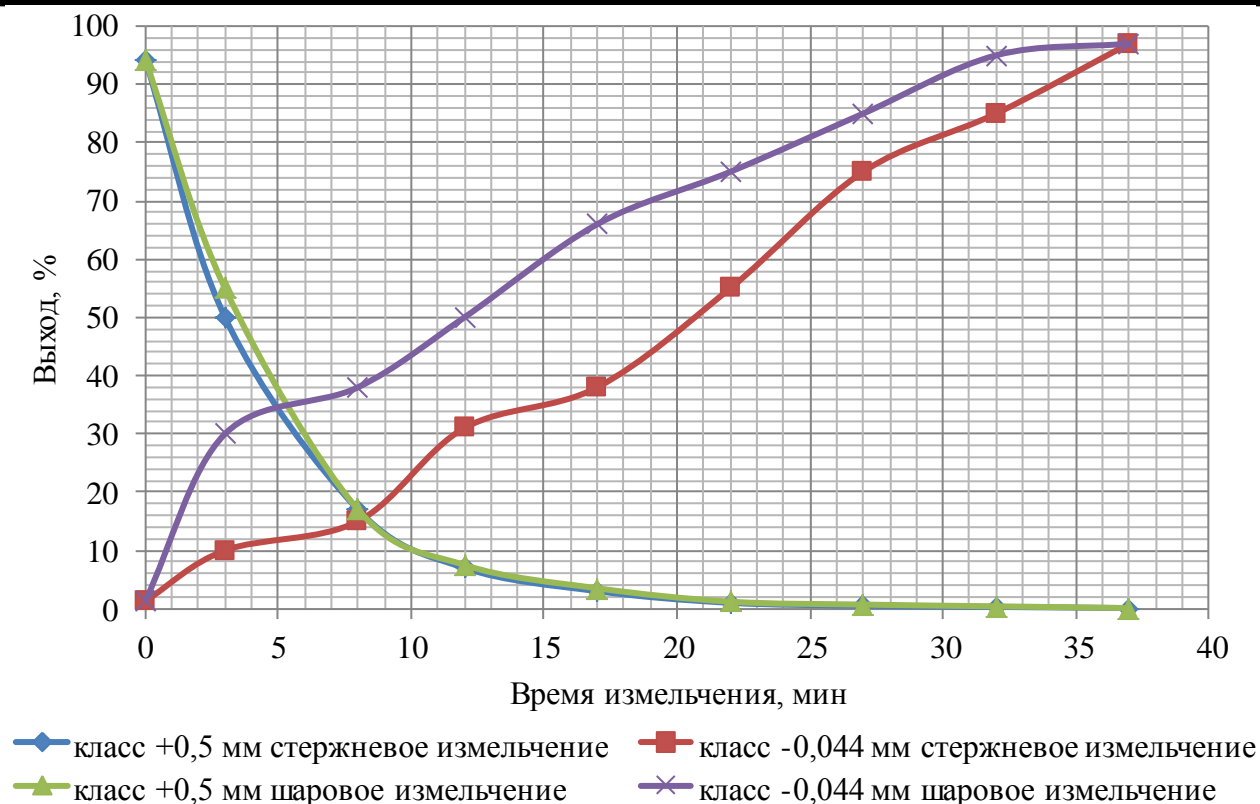


Рис. 1. Кинетика измельчения мартит-железнослюдковых кварцитов Скелеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 1) в стержневой и шаровой мельницах

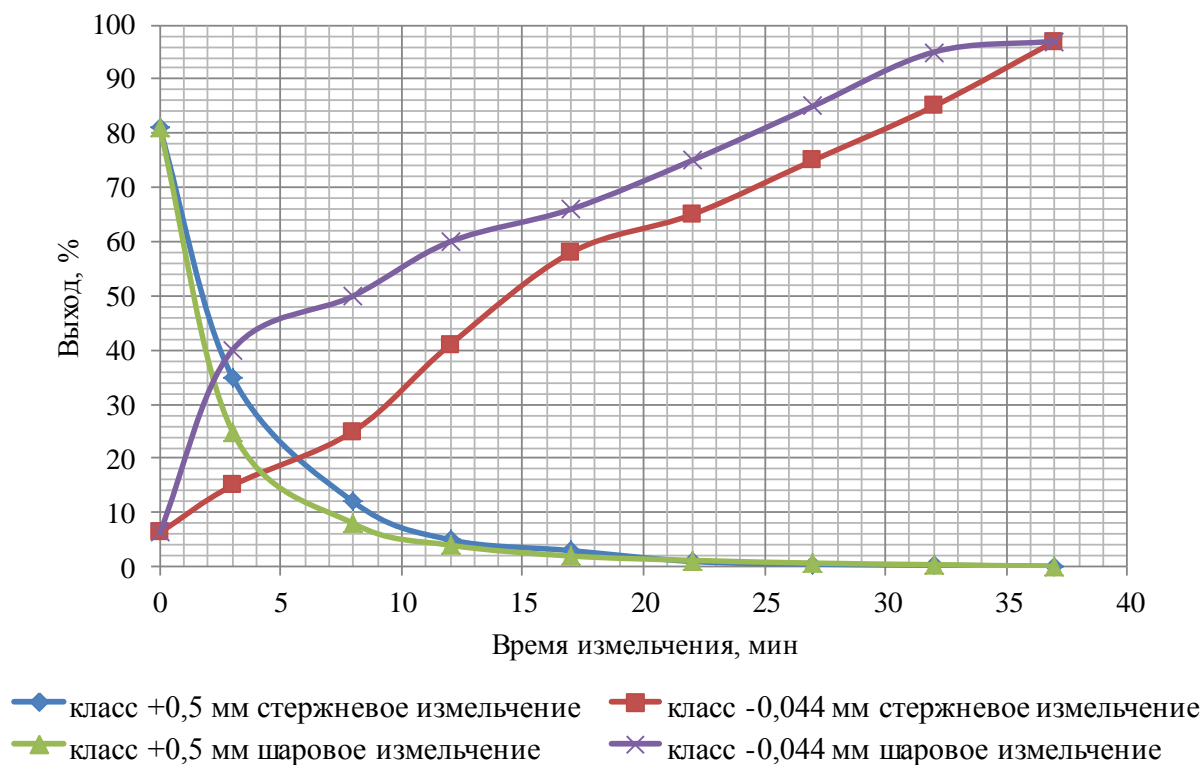


Рис. 2. Кинетика измельчения мартит-железнослюдковых кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 1) в стержневой и шаровой мельницах

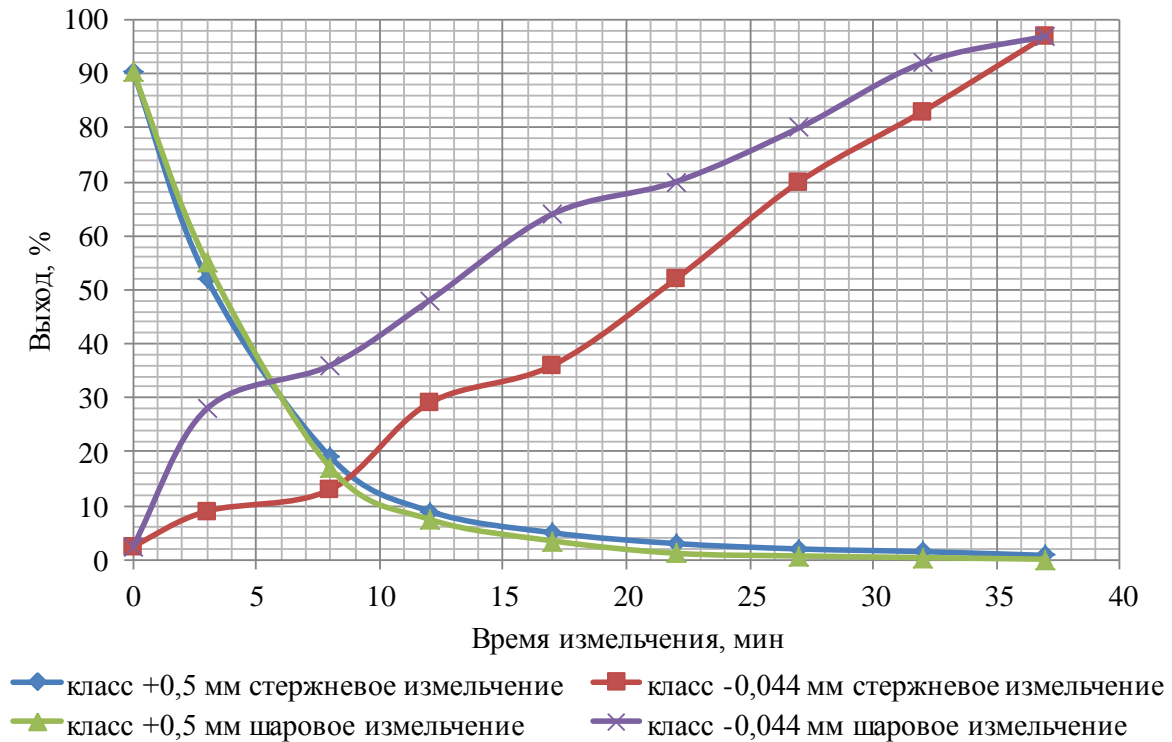


Рис. 3. Кинетика измельчения железнослюдко-мартитовых кварцитов Склеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 2) в стержневой и шаровой мельницах

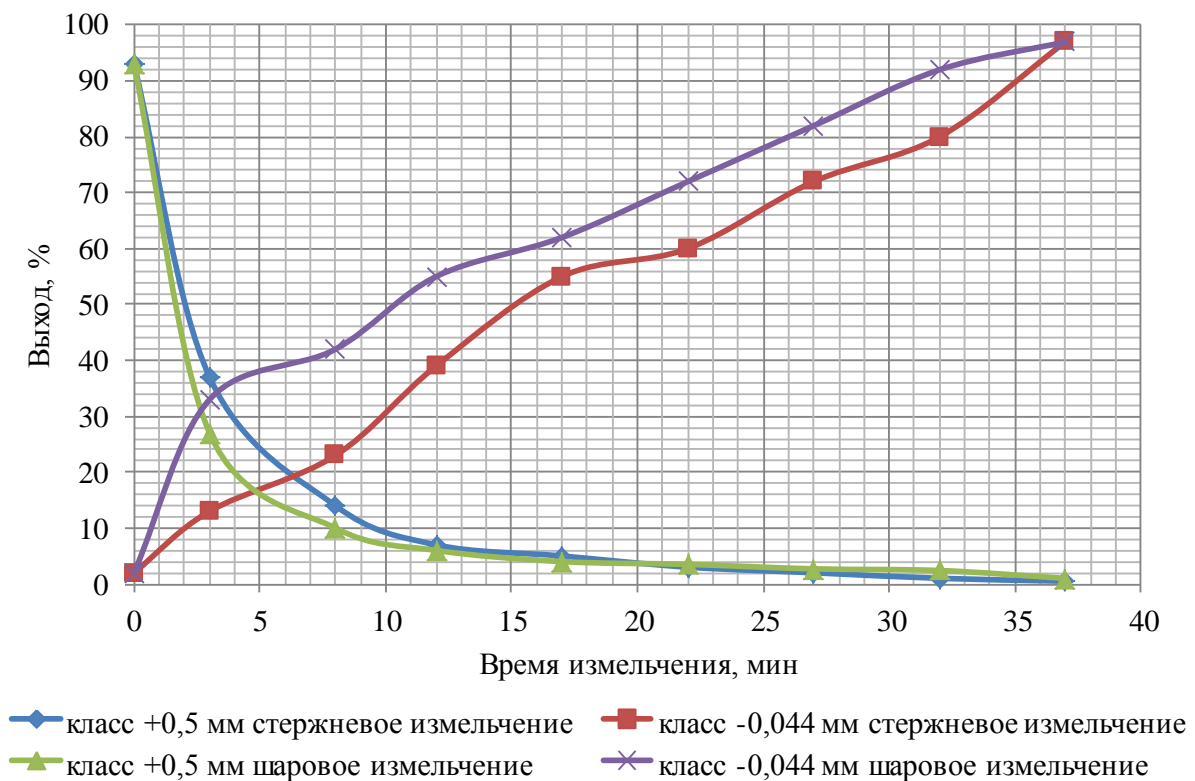


Рис. 4. Кинетика измельчения железнослюдко-мартитовых кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 2) в стержневой и шаровой мельницах

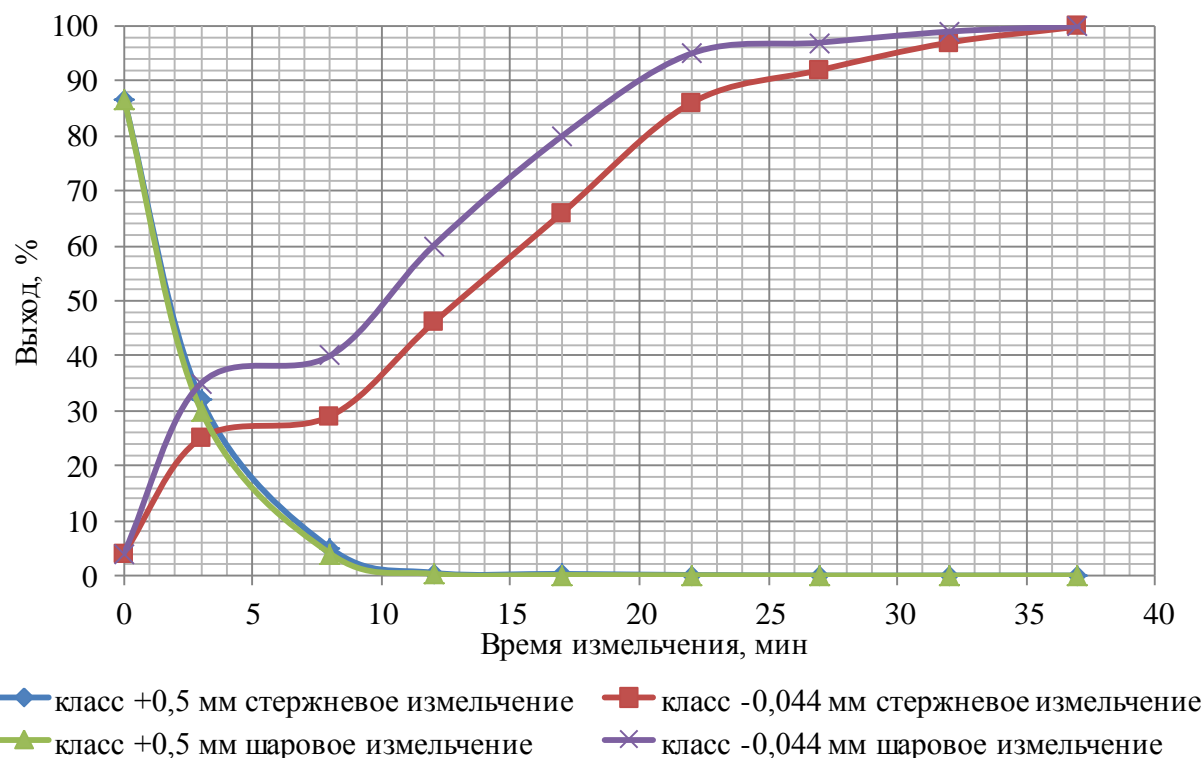


Рис. 5. Кинетика измельчения железнослюдко-мартитовых маршалитизированных кварцитов Скелеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 3) в стержневой и шаровой мельницах

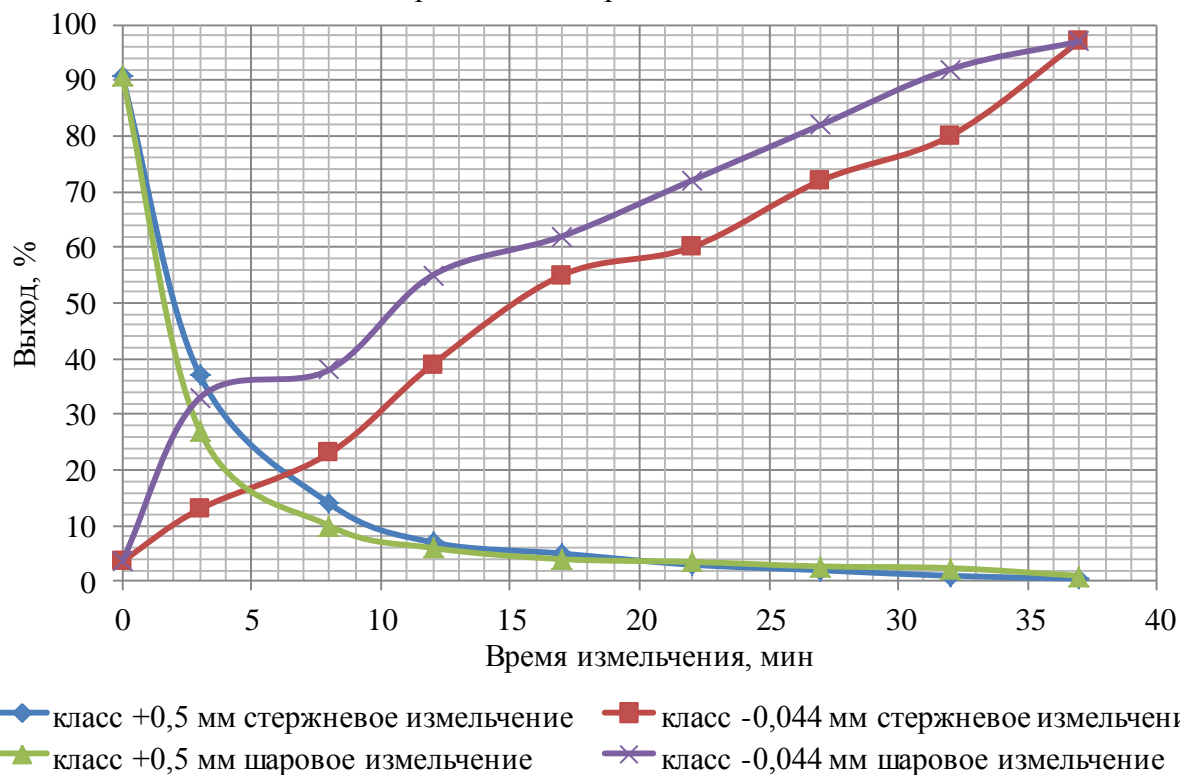


Рис. 6. Кинетика измельчения железнослюдко-мартитовых маршалитизированных кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 3) в стержневой и шаровой мельницах



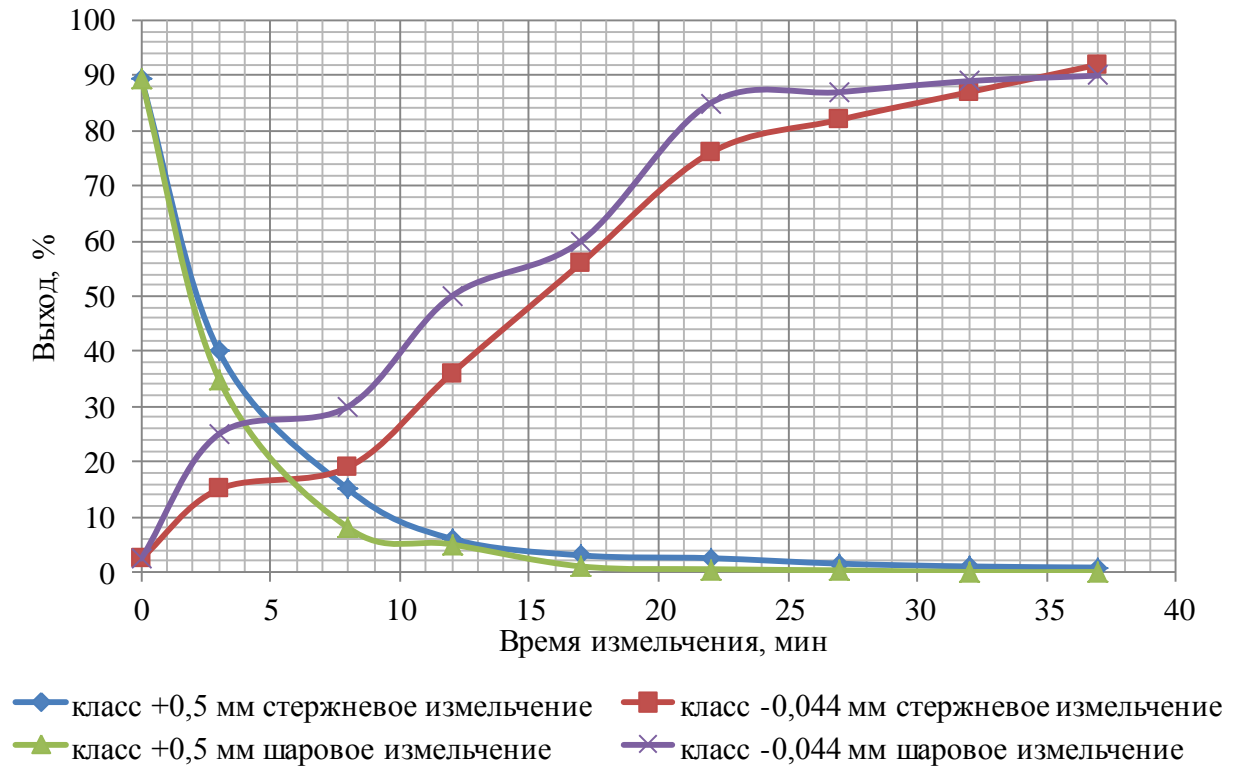


Рис. 7. Кинетика измельчения магнитовых кварцитов Скелеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 4) в стержневой и шаровой мельницах

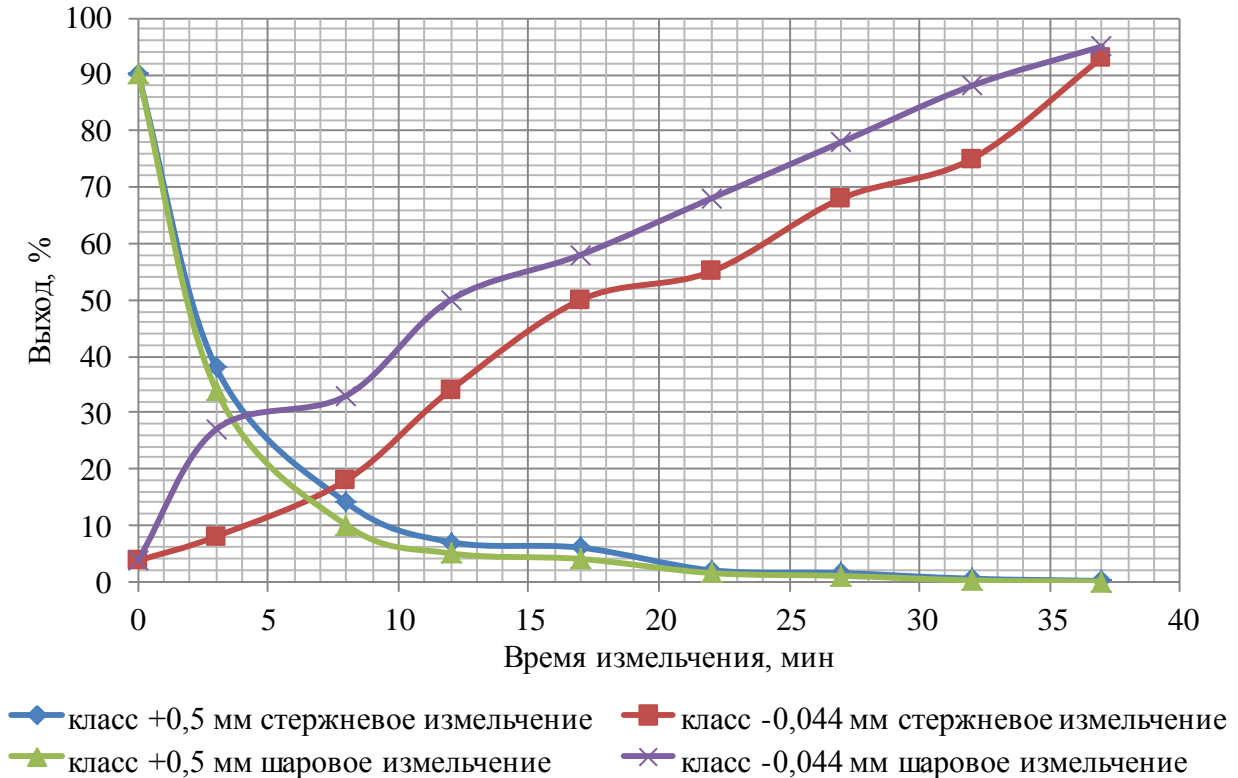


Рис. 8. Кинетика измельчения магнитовых кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 4) в стержневой и шаровой мельницах

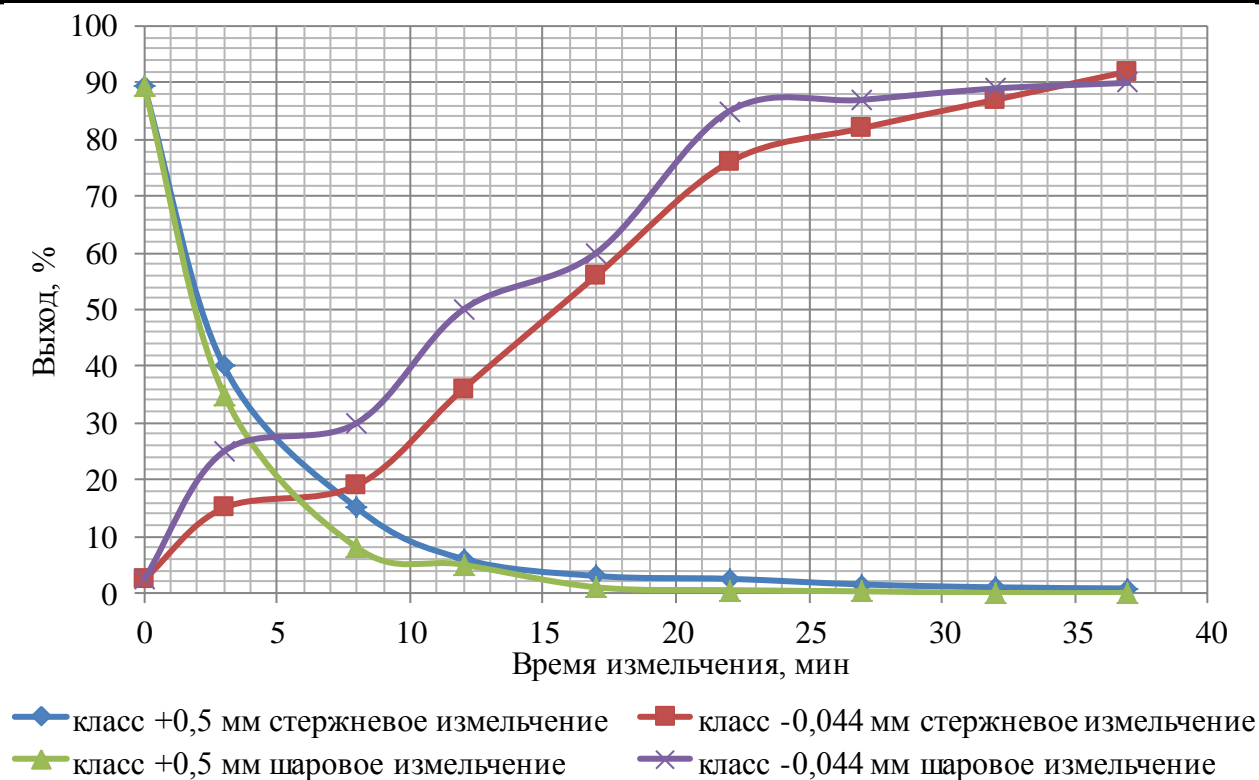


Рис. 9. Кинетика измельчения мартитовых маршалитизированных кварцитов Склеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 5) в стержневой и шаровой мельницах

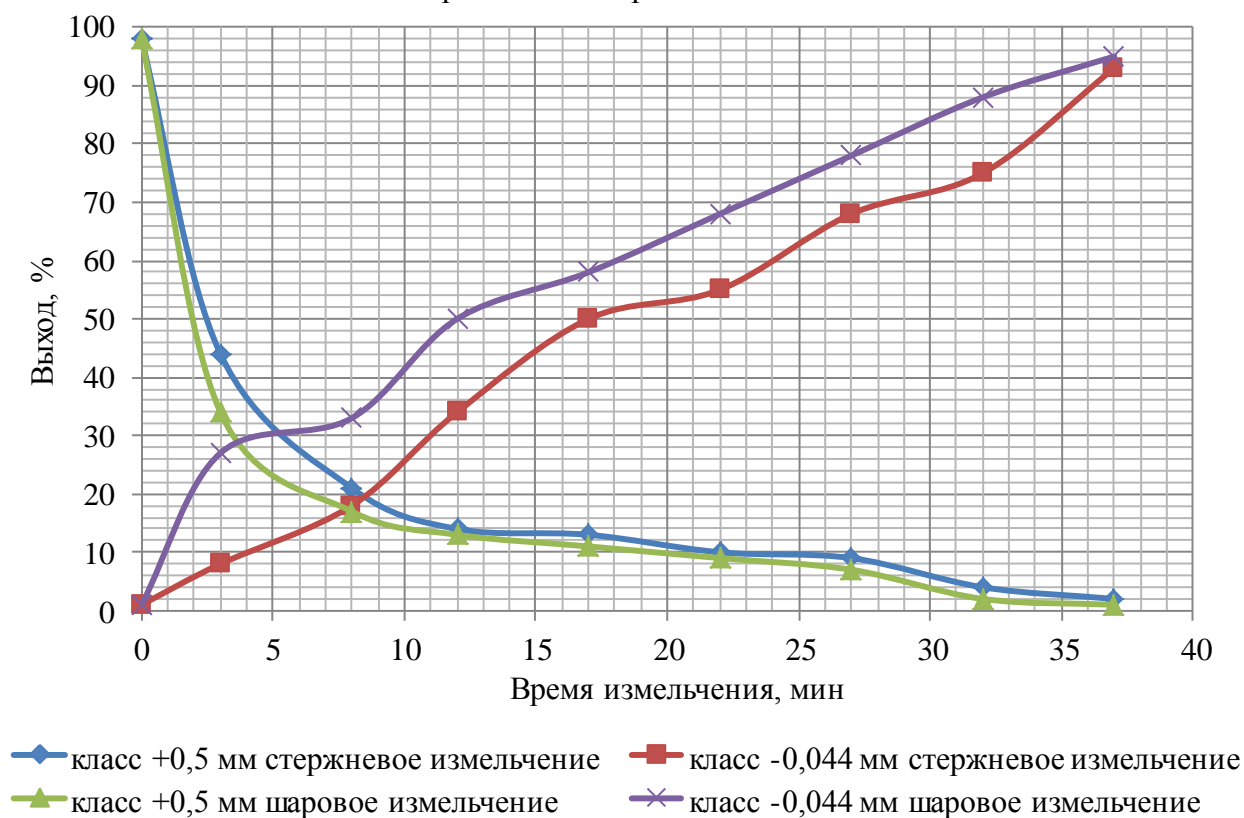


Рис. 10. Кинетика измельчения мартитовых маршалитизированных кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 5) в стержневой и шаровой мельницах

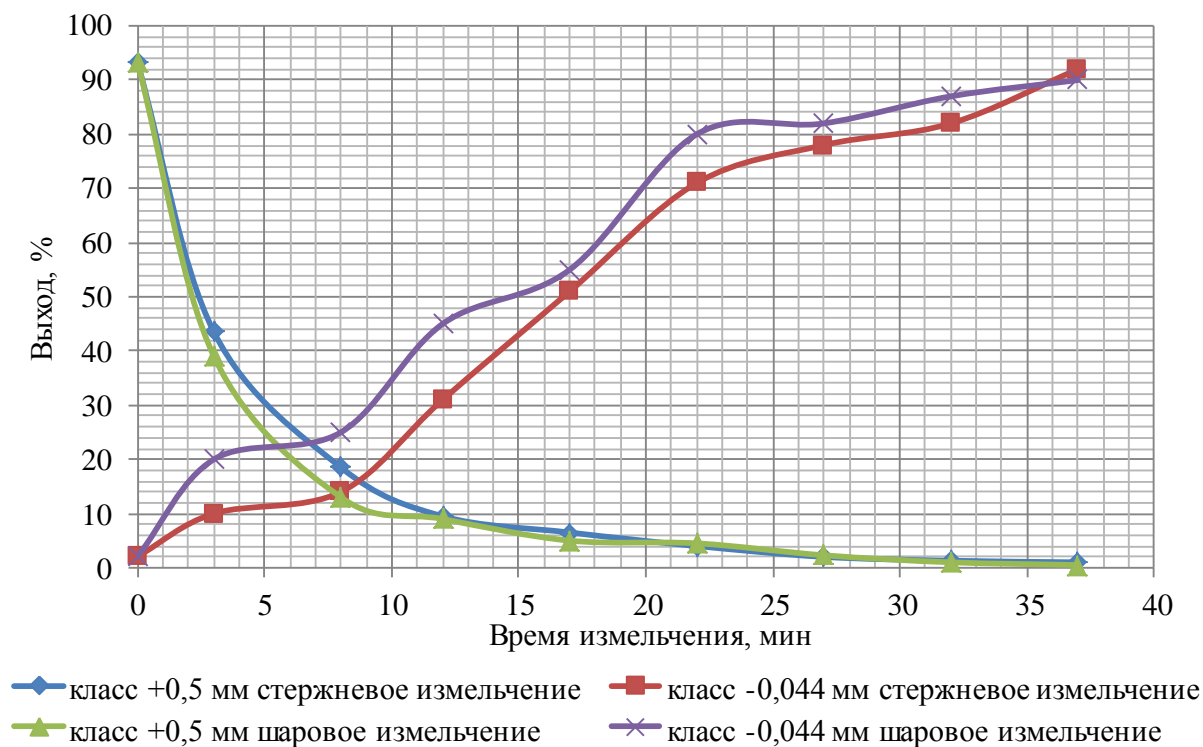


Рис. 11. Кинетика измельчения мартитовых гетитизированных кварцитов Скелеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 6) в стержневой и шаровой мельницах

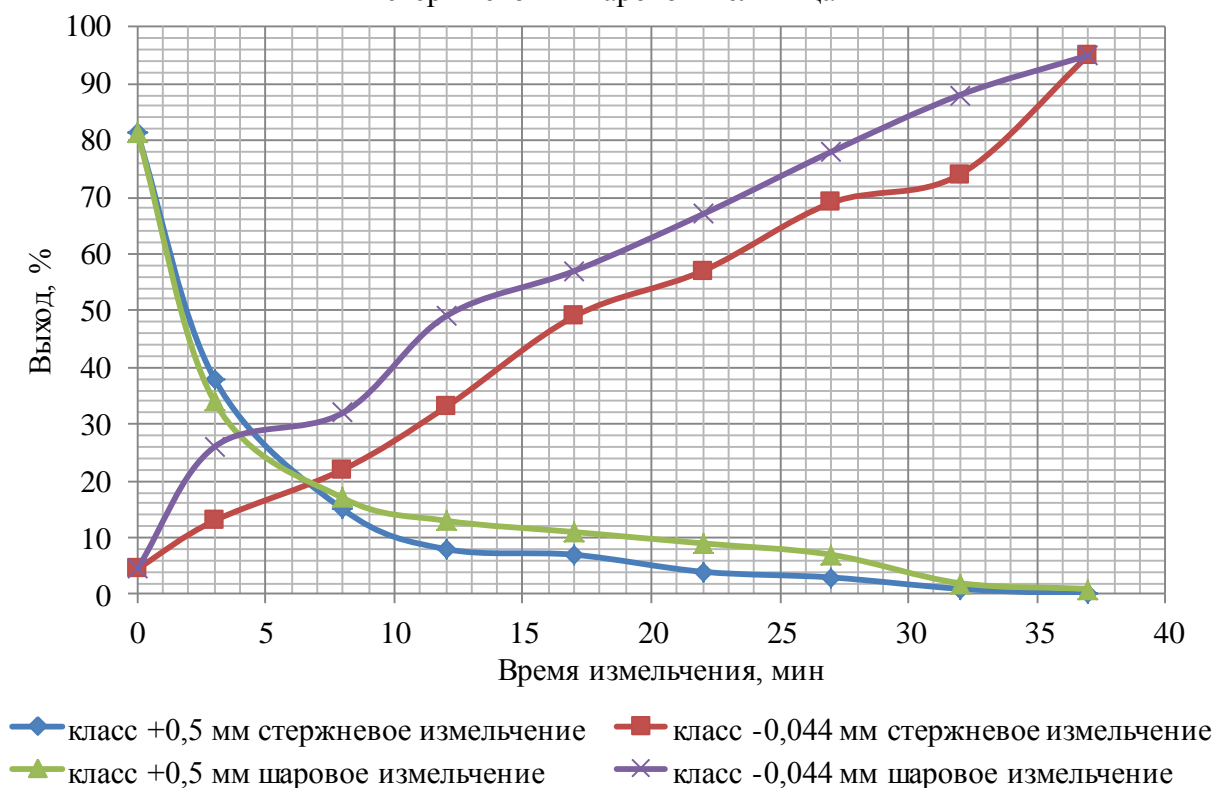


Рис. 12. Кинетика измельчения мартитовых гетитизированных кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 6) в стержневой и шаровой мельницах

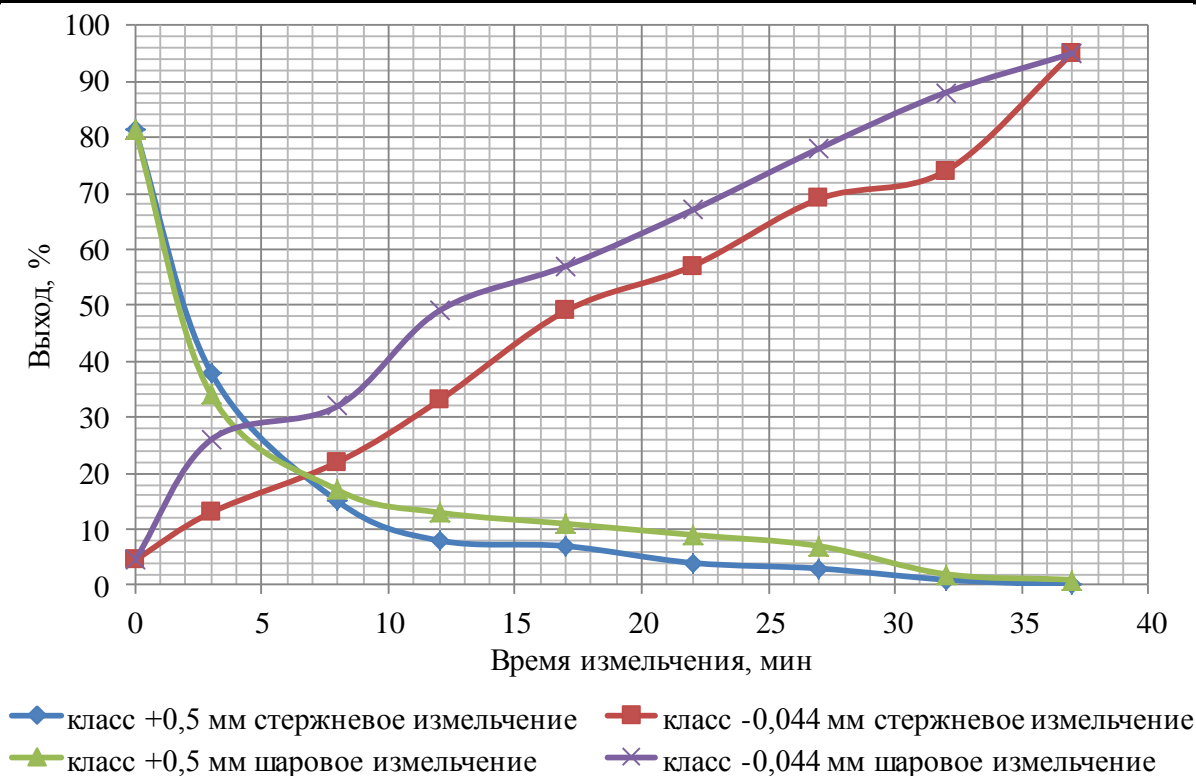


Рис. 13. Кинетика измельчения дисперсногематит-мартитовых и мартит-дисперсногематитовых железистых кварцитов Скелеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 7) в стержневой и шаровой мельницах

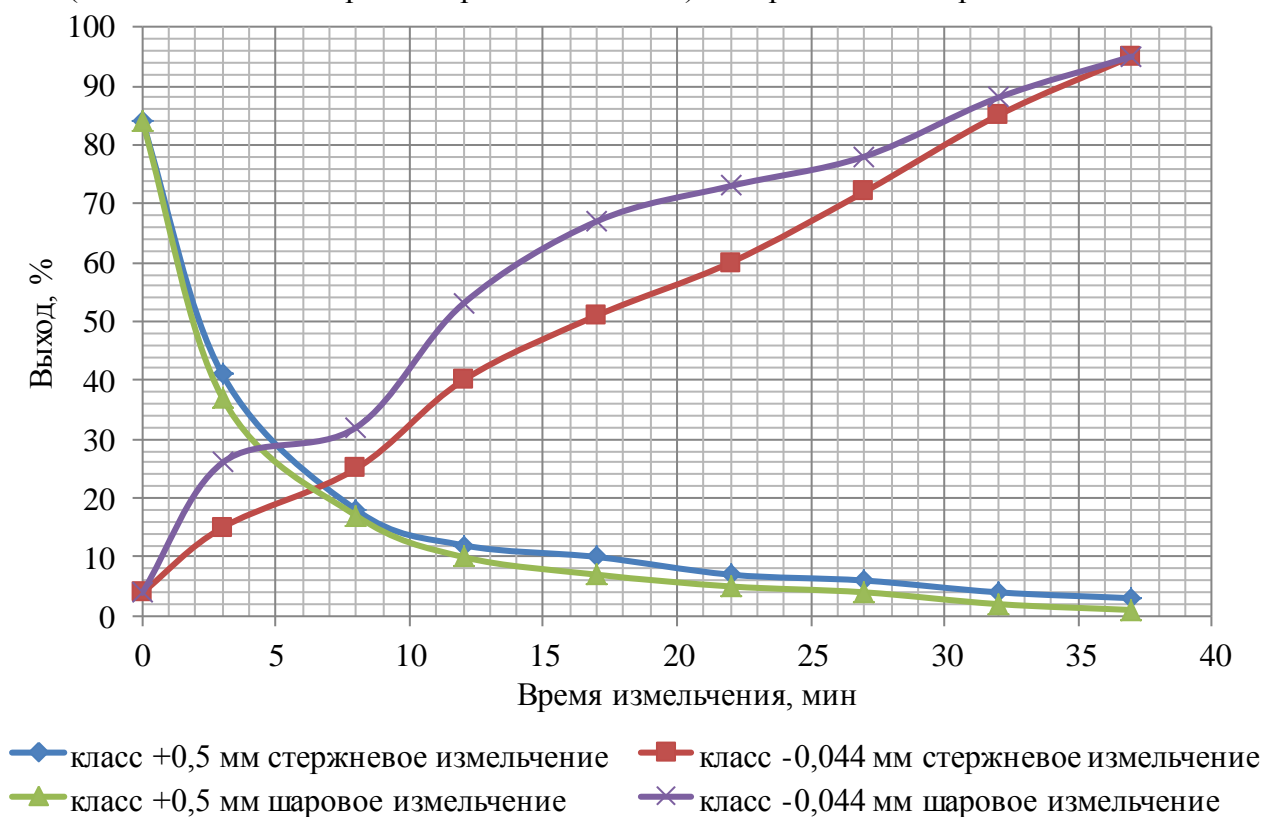


Рис. 14. Кинетика дисперсногематит-мартитовых и мартит-дисперсногематитовых железистых кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 7) в стержневой и шаровой мельницах

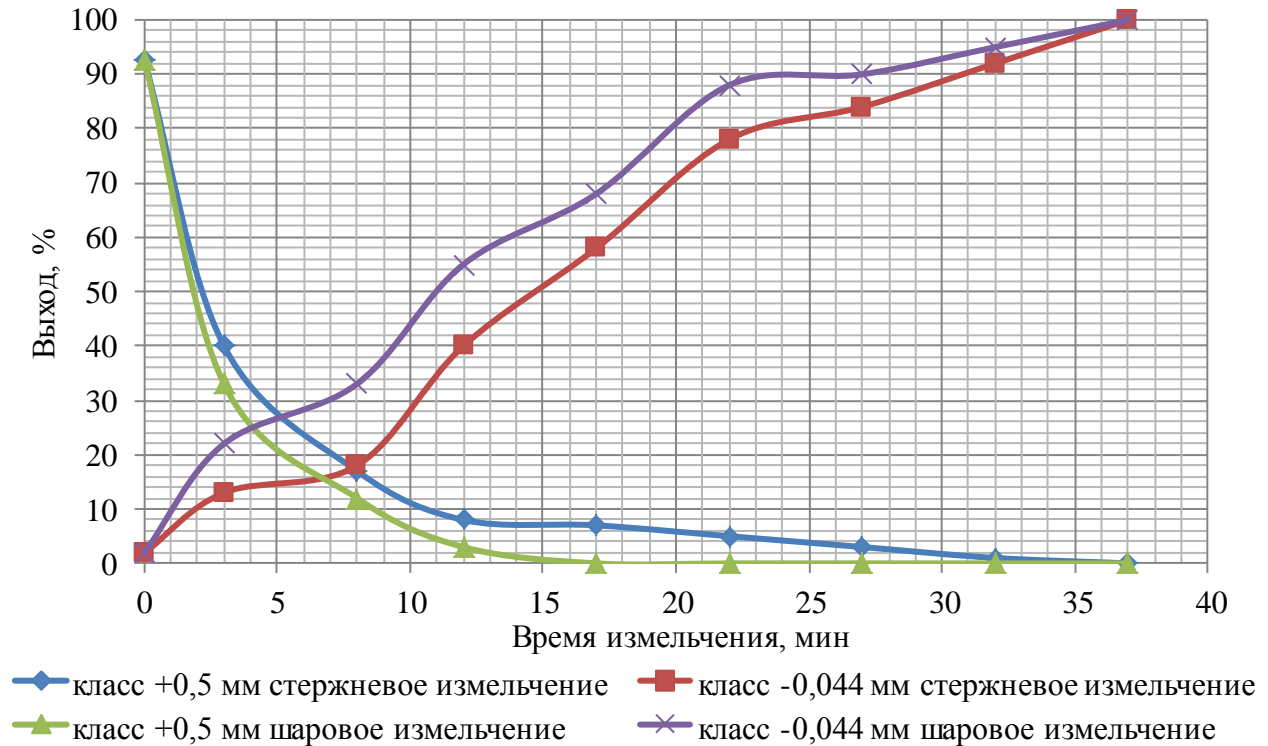


Рис. 15. Кинетика измельчения мартитовых магнетит-содержащих (слабовыветрелых) кварцитов Скелеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 8) в стержневой и шаровой мельницах

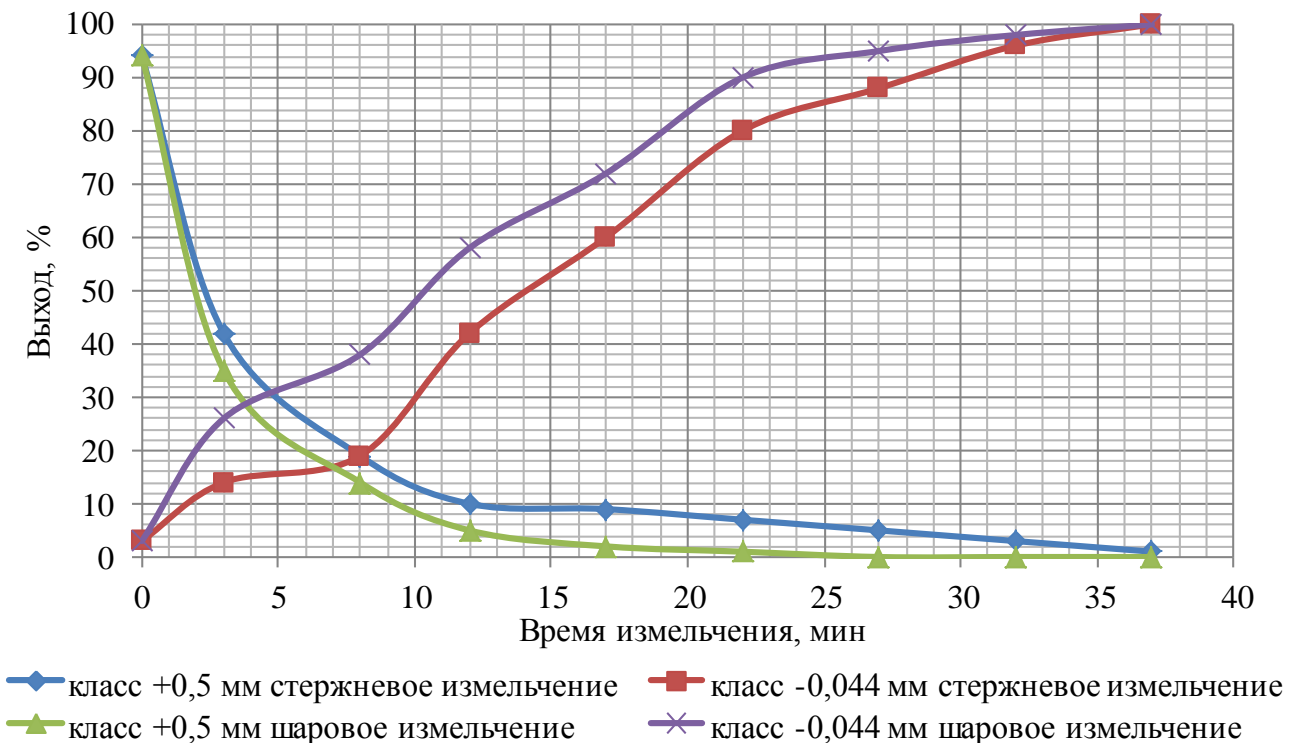


Рис. 16. Кинетика измельчения мартитовых магнетит-содержащих (слабовыветрелых) кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 8) в стержневой и шаровой мельницах

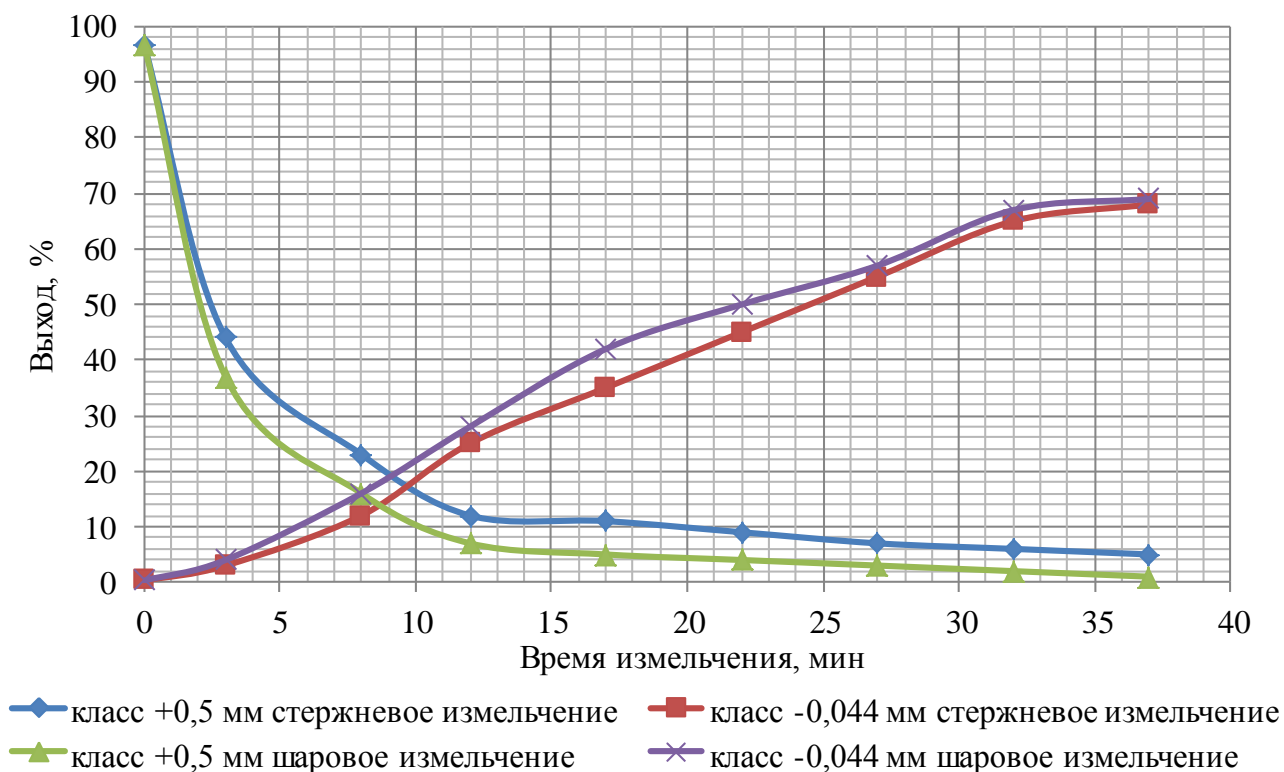


Рис. 17. Кинетика измельчения сланцев и безрудных кварцитов Склеватского месторождения (объединенная минеральная разновидность 9) в стержневой и шаровой мельницах

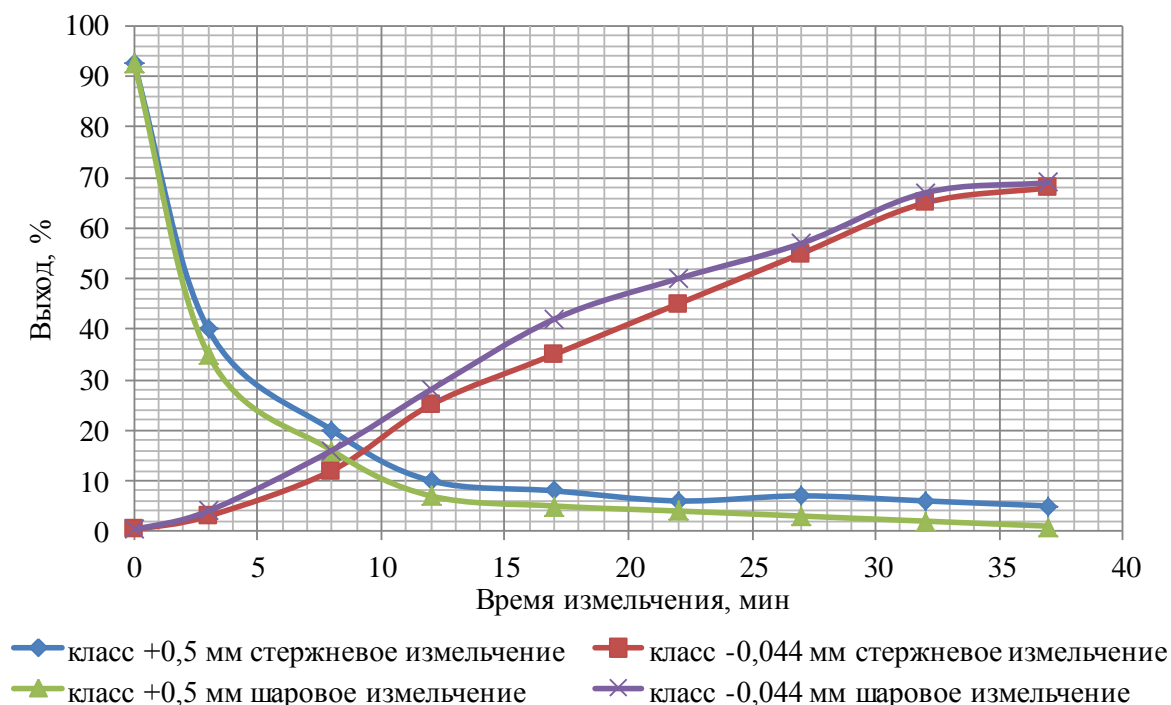


Рис. 18. Кинетика измельчения сланцев и безрудных кварцитов Валявкинского месторождения (объединенная минеральная разновидность 9) в стержневой и шаровой мельницах

Удельная производительность мельницы по вновь образованному классу в стержневой и шаровой мельницах, объемом 32 и 7 л (усредненные данные)

Вновь образованный класс	Время измельчения			
	3	8	12	17
Стержневое измельчение				
Исходная руда				
-0,074 мм	1,427	0,887	0,747	0,638
-0,044 мм	0,739	0,459	0,387	0,33
Шаровое измельчение				
Исходная руда				
-0,074 мм	1,789	1,105	0,929	0,792
-0,044 мм	0,927	0,572	0,481	0,41

*Выводы и направления дальнейших исследований*

1. Результаты изучения физико-механических свойств проб руды позволили отнести окисленные руды к категории руд средней крепости, средней дробимости, к высокоабразивным материалам, со сравнительно низкой пористостью.

2. Измельчение руды рекомендуется выполнять в две стадии: первую до 60-65% класса минус 0,07 мм, вторую – до 90-95% класса минус 0,044 мм.

3. Для измельчения в первой стадии целесообразно применять стержневые мельницы, работающие в открытом цикле.

4. Для удаления из рудных потоков разубоживающих пород рекомендуется предообогащение сырья или методом сухой магнитной сепарации или отсадкой, целесообразность которых покажут результаты дальнейших исследований и технико-экономические расчеты.

1. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. Ю.Э. Аккермана, Г.Б. Букати, Б.В. Кизевальтера и др., 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 388 с.

© Олійник Т.А., Скляр Л.В., Кушнирук Н.В., Олійник М.О., 2013

*Надійшла до редколегії 03.09.2013 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*